

Prof. dr hab. Piotr Salabura

piotr.salabura@uj.edu.pl

Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej

Uniwersytet Jagielloński

ul. Prof. Łojasiewicza 11

30-348 Kraków



JAGIELLONIAN
UNIVERSITY
IN KRAKOW

Faculty
of Physics,
Astronomy
and Applied
Computer Science

Recenzja pracy doktorskiej Pani Nory Salone „Properties of Hyperon Decays”

Praca doktorska Pani Nory Salone „Properties of Hyperon Decays” jest skoncentrowana na badaniach produkcji par hiperon-antyperon z oktetu barionowego i ich elektro-słabych rozpadów w anihilacji par pozytron-elektron w dwóch ważnych i aktualnych dla dziedziny fizyki hadronowej kontekstach.

Pierwszy kontekst to fenomenologiczne studia możliwości badań łamania symetrii CP w sektorze barionowych. Temat jest niezwykle ważny i komplementarny do badań prowadzonych od lat w sektorze mezonów ale bardzo mało poznany eksperymentalnie a przecież bezpośrednio związany z problem asymetrii liczby barionów i antybarionów we wszechświecie. Omawiana w pracy metoda eksperymentalna polegająca na produkcji par hiperon-antyperon w anihilacji pozytron-elektron w obszarze czarmonium ma bardzo solidne umocowanie w opisie teoretycznym (niezależnym modelu) i umożliwia precyzyjne porównania parametrów słabych rozpadów dla barionu i antybarionu, mierzonych w tym samym eksperymencie. Takie podejście umożliwia przeprowadzenie precyzyjnych testów symetrii CP redukując zarówno systematykę teoretyczną związaną z modelowaniem procesu produkcji jak i eksperymentalną związaną z procesem rekonstrukcji hiperonu i antyperonu. Ten drugi aspekt jest dodatkowo wzmocniony poprzez zastosowanie nowoczesnych systemów detekcyjnych o prawie pełnym pokryciu kąta bryłowego, jak np. detektor BESIII pracujący w BEPII w Chinach, i dużych świetnościach obecnych i planowanych infrastruktur badawczych wchodzących w skład Super Tau-Charm Factories (SCTF). Osiągnięciem przedstawionym w pracy jest wyznaczenie połączonych rozkładów kątowych produkcji i rozpadów nie-leptonowych par hiperonów z uwzględnieniem polaryzacji wiązki i wykazanie jej znaczenia dla uzyskania lepszej precyzji testów CP.

ul. prof. Stanisława
Łojasiewicza 11

PL 30-348 Kraków

tel. +48(12) 664-48-90

fax +48(12) 664-49-05

e-mail:

wydzial.fais@uj.edu.pl

Drugi kontekst przedstawiony w pracy to badania struktury wewnętrznej hiperonów w poprzez pomiar tzw. czynników kształtów (form-factors) w rozpadach semi-leptonowych. Osiągnięciem zaprezentowanym w pracy jest obliczenie, po raz pierwszy dla procesu anihilacji, połączonych rozkładów kątowych obejmujących procesy kreacji par hiperon-antyhiperon i rozpadu semi-leptonowego z produkcją pary leptonów (lepton-anty-neutrino). Wyznaczone rozkłady, zależne jak w przypadku rozpadów nie-leptonowych od macierzy korelacji spinów, mogą pozwolić na wyznaczenie współczynników postaci w zależności od przekazu czteropędu (w tym obszarze kinematycznym równym masie inwariantnej par leptonów). W pracy przedstawiono oszacowania precyzji pomiaru dwóch stałych sprzężenia : wektorowej g_{AV} i słabej-magnetycznej g_w , które są stosunkami 3 współczynników kształtu i służą do ich parametryzacji w funkcji przekazu czteropędu.

Praca jest oparta na dwóch publikacjach Phys.Rev D 105, 116028 (2022) i Phys.Rev.D 108, 016011 (2023) zamieszczonych w rozdziałach dwa i trzy. Doktorantka jest pierwszym autorem pierwszej pracy i współautorem drugiej (czworo autorów). Praca jest niezwykle szczegółowa w przedstawieniu teoretycznego opisu połączonych rozkładów kątowych w.w rozpadów, który jest głównym tematem. Zawiera także bardzo dobre podsumowanie wyników eksperymentów dotyczących rozpadów hiperonów i testów symetrii CP. Wychodząc z dostępnego wcześniej opisu teoretycznego w.w procesów wprowadza istotny aspekt zależności od polaryzacji wiązki leptonów i wykazuje w przekonujący sposób jej kluczowe znaczenie dla precyzji testów symetrii CP poprzez rozbudowane ilościowe oszacowania bazujące na macierzach informacji Fischera.

W mojej ocenie jest to bardzo ważna i interesująca praca, w szczególności dla planowania i analizy przyszłych eksperymentów i należy pogratulować autorce (i współautorom prac) osiągniętych wyników. Praca imponuje rozmachem i szczegółowością obliczeń i ich interpretacji. Należy także podkreślić fakt że wyniki zostały już opublikowane w wiodących czasopismach dziedziny.

Poniżej załączam omówienie poszczególnych rozdziałów.

Rozdział pierwszy zawiera syntetyczne wprowadzenie do podstaw modelu standardowego: klasyfikacji cząstek oraz głównych cech oddziaływań silnych i elektro-słabych, istotnych w kontekście pracy, Wprowadzono podstawy teoretyczne opisu rozpadów słabych nie-leptonowych i semi-leptonowych hiperonów, ze szczególnym uwzględnieniem zachowania/łamania symetrii dyskretnych C, P i symetrii kombinowanej CP w rozpadach nie-leptonowych i ich komplementarność do sektora mezonów. W szczególności wprowadzono tutaj pojęcia zespolonych czynników postaci oraz przedstawiono opis produkcji par hiperon-antyhiperon wchodzących w skład oktetu barionowego w anihilacji par pozytron-elektron oparty na tzw. formalizmie skrętności („helicity”), przedstawiony w pracy [52] (E. Peroti et. al Phys.Rev.D 99.5(2019)). Rozdział jest dobrze napisany i zawiera pomocne wprowadzenia do rachunków przedstawionych w następnym rozdziałach pracy. Warty podkreślenia jest klarowne przedstawienie wkładu doktorantki w opublikowanych pracach stanowiących rozdział drugi i trzeci pracy doktorskiej.



JAGIELLONIAN
UNIVERSITY
IN KRAKOW

Faculty
of Physics,
Astronomy
and Applied
Computer Science

Rozdział drugi zawiera zwarte podsumowanie wyników eksperymentalnych dotyczących parametrów słabych nie-leptonowych rozpadów hiperonów Λ , Σ , Ξ (tabela 2.2) oraz badanych obserwabli czułych na łamanie symetrii CP (tabela 2.1). Są one związane ze współczynnikami asymetrii α_D rozkładów kątowych produktów rozpadów, które wynikają z interferencji amplitud łamiących i zachowujących parzystość P (obserwabla A_{CP}), oraz z kątem zawartym pomiędzy spinami hiperonu (matki) i barionu-produktu rozpadu (córci) (obserwabla Φ_{CP} lub powiązane B_{CP}) Omówiono wyniki pomiarów eksperymentu HyperCP, badającego dwustopniowe rozpady kaskady Ξ w postaci znormalizowanej sumy $A_{CP}^{[\Xi]} + A_{CP}^{[\Lambda p]}$ (definicja 2.4) parametrów asymetrii rozpadu hiperonów i anty-hiperonów Λ , Ξ (α_{Ξ} , $\overline{\alpha_{\Xi}}$, α_{Λ} , $\overline{\alpha_{\Lambda}}$), której odstępstwo od zera jest sygnaturą łamania parzystości CP (przy nieznikaniu oddziaływań końcowych produktów rozpadu). Zmierzona wartość wynosi $0(7) \times 10^4$ i jest obecnie najlepszym testem łamania symetrii CP na świecie ale mieści się w granicach przewidywań modelu standardowego (SM): $-0.5 \times 10^4 \leq SM \leq 0.5 \times 10^4$. Omówiono wyniki pierwszych pomiarów obserwabli A_{CP} oraz B_{CP} w anihilacji pozytron-elektron w obszarze produkcji J/ψ w eksperymentach BESIII oraz prognozowane dokładności dla przyszłych zderzaczy (SCTF), których świetlnosc ma być o dwa rzędy wielkości większa od osiągniętych na BESIII

Okazuje się jednak że aby osiągnąć lepszą precyzję samo zwiększenie świetlności jest nie wystarczające i konieczne jest zwiększenie energetycznej zdolności rozdzielczej zderzaczy oraz wprowadzenie polaryzacji wiązki elektronów, co jest główną tezą zaprezentowaną w dalszej części rozdziału. Inną istotną zaletą pomiaru anihilacji par e^+e^- , dyskutowaną w rozdziale, jest możliwość pełnej rekonstrukcji pary hiperon-antyhiperon w tej samej konfiguracji detektorów poprzez pełną rekonstrukcję rozpadu jednego z hiperonów (tzw. single tag-ST) jak i dwóch jednocześnie (tzw. double tag-DT). W przypadku dwustopniowego rozpadów hiperonu $\Xi^- \rightarrow \Lambda \rightarrow (p\pi)\pi^-$ rekonstrukcja produktów rozpadów obu hiperonów umożliwi pomiar polaryzacji obu hiperonów i pozwala na określenie kąta ϕ_D zawartego pomiędzy spinami (analogicznie dla anty-hiperonu). Umożliwia to pomiar drugiej, badanej w pracy, obserwabli czułej na łamanie symetrii CP: $\Phi_{CP} = (\phi_D + \overline{\phi_D})/2$, związanej bezpośrednio z fazami oddziaływań słabych łamiących parzystość CP (wzory 2.26-2.29). Wyznaczenie obserwabli wymaga także znajomości przesunięć fazowych wynikających z oddziaływań silnych hadronów w stanie końcowym w falach parcjalnych S i P (dla izospinów 1/2 i 3/2), co w przypadku protonu i pionu jest dobrze znane ale w przypadku pary Λ , pion jest obarczone większą niepewnością. Olbrzymią zaletą badania produkcji hiperonów w anihilacji pozytron-elektron jest niezależność od modelu obliczenia amplitud produkcji. Zostały one przedstawione w rozdziale 2.3 w reprezentacji skrętności (helicity) w postaci macierzy gęstości spin pary hiperon-antyhiperon. Macierze produkcji zostały połączone (rozdział 2.3.2) z opisem nie-leptonowych rozpadów hiperonów prowadząc do ogólnego sformułowania połączonych rozkładów kątowych (produkcji i rozpadu) dla rozpadów jednostopniowych (wzór 2.46) i dwustopniowych (2.50). Wkładem doktorantki zostało przedstawienie macierzy

ul. prof. Stanisława
Łojasiewicza 11

PL 30-348 Kraków

tel. +48(12) 664-48-90

fax +48(12) 664-49-05

e-mail:

wydzial.fais@uj.edu.pl

w zależności od polaryzacji wiązki elektronów P_e , która jak wykazano w dalszej części rozdziału ma istotny wpływ na polaryzacje hiperonów (rys.2.4) i w konsekwencji istotne zwiększenie precyzji testów symetrii CP, i macierzy korelacji spinów barionów $S_{B\bar{B}}$ zależnych od kąta produkcji. Precyzja obserwacji CP dla rozpadów Λ, Σ, Ξ została określona przy pomocy macierzy informacji Fischera, będącej odwrotnością macierzy kowariancji, wyrażonej poprzez pochodne cząstkowych funkcji gęstości prawdopodobieństwa rozkładów kątowych (wzory 2.46/2.50) od wektora parametrów, który dla procesów jednostopniowych zależy od parametrów produkcji ($\alpha_\psi P_e \Delta\Phi$) i rozpadu ($\alpha_D, \overline{\alpha_D}$). Niepewności A_{CP} została wyznaczona numerycznie oraz w przybliżeniu analitycznym, posługując się pierwszym członem rozwinięcia odwrotności funkcji gęstości prawdopodobieństwa 2.46 względem A_{CP} (wzór 2.58) zakładając zależność liniową α_D od A_{CP} i brak korelacji z innymi parametrami. To założenie nie było dla mnie oczywiste i chciałbym się dowiedzieć jakie przeprowadzono badania których wyniki zawarto w tabeli 2.6 (co oznaczają np. poziome kreski zawarte w tabeli?) Precyzja wyznaczenia obserwacji A_{CP} jest określona w postaci tzw. współczynnika odchylenia standardowego $\sigma_C(A_{CP})$, wyrażonego jako iloczyn odchylenia standardowego danego parametru i błędu statystycznego \sqrt{N} (definicja 2.53), i zależy od średniej polaryzacji hiperonu. Wynik dla jednostopniowych procesów z produkcją Λ, Σ poprzez J/ψ i rozpadem są przedstawione na rys. 2.6, gdzie widoczne jest znaczne zwiększenie precyzji w funkcji polaryzacji wiązki której konsekwencją jest wzrost średniej polaryzacji hiperonów, przedstawionej na rysunku 2.4. W przypadku procesów dwustopniowych, czyli rozważanej w pracy produkcji i rozpadu pary kaskada-antykaskada Ξ , współczynniki odchylenia standardowych $\sigma_C(A_{CP})$ dla Ξ, Λ oraz ich sumy (odpowiadające pomiarowy HyperCP) oraz możliwego do określenia w tym procesie Φ_{CP} podaje rysunek 2.7 w zależności od polaryzacji kaskady. Rysunki 2.9 i 2.10 podają zależności $\sigma_C(A_{CP})$ od polaryzacji wiązki P_e w pomiarach typu ST oraz DT dla tej samej ilości zdarzeń. Analiza tych zależności wskazuje generalnie większą precyzję dla pomiarów typu DT, która jednak zbliża się do precyzji pomiarów typu ST przy dużej polaryzacji wiązki. Widać także większy wzrost precyzji testu CP dla ST w funkcji P_e niż dla DT. Powyższe wyniki są dalej dyskutowane w rozdziale 2.6 w kontekście efektów wydajności na rekonstrukcję, której redukcji należy oczekiwać w przypadku pomiarów typu DT. Zaproponowany typ pomiaru polegający na podziale zdarzeń na 3 równe zbiory podlegające analizie DT i ST (dwa dla hiperonu i antyhiperonu) i ich kombinacji prowadzi do generalnie najlepszej precyzji pomiarów : rysunek 2.12 przedstawiający $\sigma_C(A_{CP})$ dla Λ w pomiarach procesu jednostopniowego oraz rysunek 2.13 przedstawiający (a) $\sigma_C(A_{CP})$ dla Ξ (b) Φ_{CP} oraz (c) $\sigma_C(A_{CP})$ dla Λ , oba w funkcji polaryzacji wiązki. Powyższe analizy oraz wyniki, choć bazujące na bardzo uproszczonych założeniach co do wydajności układów detekcyjnych niezależnych od zmiennych kinematycznych, są bardzo cenne dla planowania przyszłych eksperymentów na SCTF. W kontekście dyskusji wyników zabrakło mi jedynie konkretnego przykładu pokazującego oczekiwaną precyzję testów CP z zastosowaniem ulepszeń dyskutowanych w tym rozdziale (polaryzacja wiązki, parametry świetlności i skrzyżowania wiązek) w świetle ograniczeń



JAGIELLONIAN
UNIVERSITY
IN KRAKOW

Faculty
of Physics,
Astronomy
and Applied
Computer Science

dyskutowanych na str60-61 w odniesieniu do przedstawionych w tabeli 2.1 oraz granic precyzji teorii wynikające z aktualnych przewidywań modelowych.

Rozdział trzeci zawiera pracę opublikowaną w Phys.Rev.D 108, 016011 (2023) z pierwszym wyprowadzeniem połączonych rozkładów kątowych procesu produkcji oraz semi-leptonowych rozpadów hiperonów na nukleon/hiperon i parę lepton-anty neutrino (z $\Delta S=0,1$). Warto dodać iż przedstawiony formalizm jest na tyle ogólny że może także być zastosowany do przejść radiacyjnych pomiędzy hiperonami z oktetu barionowego ($J=1/2$) z emisją rzeczywistego i wirtualnego fotonu z kreacją par $e+e^-$, czyli tzw. rozpadów Dalitza.

Opracowanie korzysta z metod przedstawionych w rozdziale drugim rozszerzając badany proces na rozpady semi-leptonowe. Proces jest rozważany w bazie helicyty związanej z układem spoczynkowym rozpadającego się hiperonu w którym zdefiniowane są odpowiednie czynniki postaci: wektorowe i osiowe, indeksowane skrętnością hiperonu i pośredniczącego wirtualnego bozonu wektorowego W , konwertującego do pary leptonów (rozdział 3.4). Dla rozważanych przejść jest to 6 współczynników kształtu, które są związane z 3 kowariantnymi współczynnikami kształtu w elektro-słabych prądach wektorowych i aksialnych ($F_{1,2,3}^V, F_{1,2,3}^A$). Zależność czynników postaci od przekazu czteropędu q^2 (równego w tym przypadku kwadratowi masy inwariantnej leptonów) jest przedstawiona na rysunku 3.3 dla rozpadu Λ i neutronu, który także może być badany w procesach anihilacji. Biorąc pod uwagę bardzo mały zakres q^2 dostępny w tych rozpadach, zmiany niektórych współczynników kształtu są duże. Połączone rozkłady kątowe są obliczone w najogólniejszym przypadku procesu w którym oprócz rozpadu semi-leptonowego hiperonu (współczynniki rozgałęzienia są rzędu 10^{-4}) jest mierzony także rozpad nie-leptonowy partnera (antyhiperonu) (rozdziały 3.5 i 3.6). Taki pomiar umożliwiając badania wpływu efektów splątana spinów barionów. W rozdziale 3.7 przedstawiono interesujące oszacowanie precyzji wyznaczenia stałych sprzężenia wektorowego (g_{av}) i słabego-magnetycznego (g_w), zdefiniowanego jako iloraz czynników postaci F_1^A i F_2^V do F_1^V w granicy $q^2=0$, w rozpadach hiperonu Λ w reakcjach bezpośredniej produkcji, jak i w procesie dwustopniowym rozpadu Ξ . Dla tych rozpadów wyznaczono połączone rozkłady kątowe (wzór 3.64), które pozwalają zbadać wpływ korelacji spinów i polaryzacji hiperonu Λ oraz polaryzacji wiązki elektronów (omówione także w rozdziale 2 dla rozpadów nie-leptonowych). Wynik badań pokazuje taką samą wartości precyzji stałych, jeżeli polaryzacja Λ jest nie mierzona. Drugą klasą badanych reakcji były rozpady semi-leptonowe hiperonów Σ, Ξ w których polaryzacja stanu pośredniego (Λ lub Σ^+) jest mierzona przez pomiar asymetrii w odpowiednich rozpadach nie-leptonowych. W tym przypadku uzyskuje się dla niektórych rozpadów polepszenie precyzji (dla Σ^+ i Ξ^-). Generalnie jednak, jak pokazuje wynik na rysunku 3.4, zwiększenie początkowej polaryzacji hiperonu zwiększa precyzję wyznaczenia stałych sprzężenia. Otwartym dla mnie pytaniem pozostaje możliwość i precyzja wyznaczenia samych współczynników kształtów. Po uwzględnieniu założeń wynikających z symetrii zapachu $F_3^V=0$ i $F_2^A=0$ pozostają cztery czynniki postaci a zmierzone stosunki dają jedynie dwie stałe.

ul. prof. Stanisława
Łojasiewicza 11
PL 30-348 Kraków
tel. +48(12) 664-48-90
fax +48(12) 664-49-05
e-mail:
wydzial.fais@uj.edu.pl

Podsumowując stwierdzam, iż przedstawiona do recenzji praca mgr. Nory Salone zawiera bardzo wartościowe wyniki, uzyskane po raz pierwszy i wnoszące istotny wkład do dyscypliny. Praca spełnia warunki ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym doktora i wnoszę do Rady Dyscypliny Nauk Fizycznych NCBJ o dopuszczenie Pani Nory Salone do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Z poważaniem

Piotr Salabura